

钻孔灌注嵌岩桩的变形与破坏

姬晓辉

吕福庆

(武汉水利电力大学 武汉 430072) (中国科学院武汉岩土力学研究所 武汉 430071)

摘要 根据桩的现场静载试验结果,分析研究了钻孔灌注嵌岩桩的承载-变形-破坏特征。认为钻孔灌注嵌岩桩属端承摩擦桩,其极限承载力主要由桩侧土层摩阻力和嵌岩段的嵌固力提供,而桩端反力只有在嵌岩段发生相当位移之后方能发挥作用;钻孔灌注嵌岩桩的变形与破坏可大体划分为大变形渐进式破坏和小变形突然破坏两种类型,具体破坏模式可能有两种:桩体材料发生破坏或桩的嵌岩部分发生破坏。

关键词 桩基 钻孔灌注嵌岩桩 变形 破坏 $Q \sim S$ 曲线 极限承载力

由于超高层建筑的兴建,钻孔灌注嵌岩桩得到了广泛应用。按照桩的荷载传递机制,可把桩分为摩擦桩、端承摩擦桩、端承桩和摩擦端承桩四种。钻孔灌注嵌岩桩是介于摩擦桩与端承桩之间的中间桩型,属端承摩擦桩类^[1],桩的垂直荷载主要由桩侧摩阻力来承担,不足部分由端阻力(包括嵌固力)来分担。

一根质量合格的桩,其材质强度、承载能力、变形特性都应满足设计要求。为此,几乎所有的桩基工程,都毫不例外地按规范的规定对桩进行了静载试验和动载试验,以确定桩的极限承载力、变形特性和桩体质量。这就为研究钻孔灌注嵌岩桩的承载-变形(沉降)-破坏提供了丰富资料。

1 承载特点

从理论上分析,钻孔灌注嵌岩桩的极限承载力由三部分组成,即桩侧极限摩阻力、嵌岩段桩侧极限摩阻力和极限端阻力,见图1。其竖向极限承载力标准值可用下式表示^[2]

$$\begin{aligned} Q_{uk} &= Q_{sk} + Q_{rk} + Q_{pk} \\ &= U \sum_{i=1}^n \xi_{si} q_{ski} L_i + U \xi_r f_{rc} H_r + \xi_p f_{rc} A_p \\ &= U \left(\sum_{i=1}^n \xi_{si} q_{ski} L_i + \xi_r f_{rc} H_r \right) + \xi_p f_{rc} A_p \quad (1) \end{aligned}$$

式中 U 为桩的周长; ξ_{si} 为土层侧阻力发挥系数; q_{ski} 为桩周第 i 层土的极限侧阻力标准值; L_i 为第 i 层土层厚度; ξ_r 、 ξ_p 分别为嵌岩段侧阻力和端阻力修正系数; f_{rc} 为岩石饱和单轴抗压强度; H_r 为桩的嵌岩深度; A_p 为桩底面积。

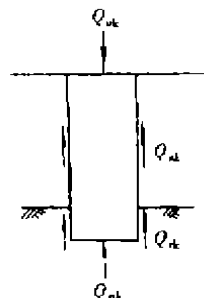


图1 嵌岩桩受力示意图

根据桩的静载试验结果,从 $Q \sim S$ 曲线可以确定嵌岩桩的极限承载力,从 $\log Q \sim S$ 曲线用作图法可以较为准确地确定钻孔灌注嵌岩桩极限承载力、极限侧阻力以及端承阻力的大小。

表1列出了用上述方法确定的4根桩的极限承载力、极限侧阻力和极限端承力的数据。由数据可知:

$$Q_{sk} > (Q_{rk} + Q_{pk}) \quad (2)$$

表1 破坏桩的荷载分配比

桩号	桩长 l/m	桩径 r/m	入岩深 h/m	岩性	破坏荷载 Q/kN	极限承载力 Q_{uk}/kN	极限侧阻力 Q_{sk}/kN	极限端承力 $(Q_{sk} + Q_{pk})/kN$	Q_{sk}/Q_{uk}
D ₁	44.30	0.80	3.20	砾岩	10500	10200	7800	2400	76%
D ₂	44.00	0.80	2.50	砾岩	10950	10500	8300	2200	79%
SH ₂	50.00	1.00	4.30	砂质泥岩	14000	13300	8000	5300	60%
TP ₂	55.45	1.20	6.75	粉砂岩	14300	13000	8700	4300	67%

注:此处的极限承载力是根据 $Q \sim S$ 曲线确定的。

而 Q_{sk}/Q_{uk} 在 60% ~ 79% 之间,说明土层极限侧阻力在极限承载力中发挥主导作用,而嵌岩段端承阻力则发挥次要作用。

由于从 $\log Q \sim S$ 曲线用作图法不能分别确定 Q_{sk} 和 Q_{pk} 的大小,只能求出 $Q_{sk} + Q_{pk}$ 之值,因此,不能比较其大小。但不考虑土层对桩的侧阻力,只考虑嵌岩段的侧阻力(嵌固力),而且,桩端悬空的模型试验结果表明,桩仍可承受较大的荷载而不发生破坏。因此,我们可以推断,在实际桩的嵌岩段中嵌固力发挥主导作用,桩端反力只起次要作用,且只有在嵌岩段桩发生一定量的剪切位移之后方能发挥作用。据此,当嵌岩段剪切位移很小时可认为 $Q_{pk} \approx 0$ 。因而式(2)可改变为

$$Q_{sk} > Q_{pk} > (Q_{pk} \approx 0)$$

或 $Q_{sk} > Q_{pk}$ (3)

式(3)表明,在钻孔灌注嵌岩桩单桩承载力的设计计算中,可以只考虑土层的侧阻力和嵌岩段的侧阻力(嵌固力),不考虑桩端反力,而把桩端反力作为安全储备是可取的。

2 $Q \sim S$ 曲线的特点及破坏模式^[2]

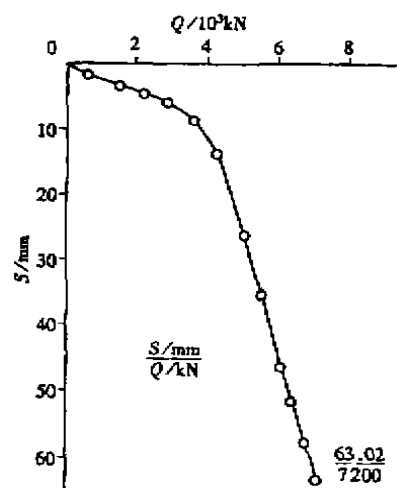
所谓桩的破坏,主要是指桩在高荷载作用下,桩顶沉降超过了允许值,或桩体材料发生破坏,或持力层(土或岩石)发生破坏的现象。这些现象一般都可以从 $Q \sim S$ 曲线上判断出来。

钻孔灌注嵌岩桩属端承摩擦桩,由于持力层为岩石,且桩端又嵌入可压缩性很小的中风化或微风化基岩之中,因此嵌岩桩的 $Q \sim S$ 曲线的特点及破坏与摩擦桩相比有独特的特点。

2.1 大变形渐进式破坏型

图2中 Jen5 号桩的 $Q \sim S$ 曲线为其典型

代表。该桩桩长 53.20 m,桩径 0.8 m,桩嵌入强风化砂岩 2.20 m,桩端置于中风化砂岩顶面;要求加载值为 7000 kN,实际加载为 7200 kN,桩沉降达 63.02 mm。若按 40 mm 取值^[3],则桩的极限承载力只有 5800 kN,达不到设计要求。这类桩的破坏特点是,在较高荷载作用下,桩发生了远大于 40 mm 的沉降,但桩在每级荷载作用下,仍能达到稳定标准(但时间较长)而不发生突然破坏, $Q \sim S$ 关系曲线没有明显拐点。 $\log t \sim S$ 曲线基本上保持线性关系,而且由密变疏,级差沉降增加。产生这种类型破坏的原因,则很可能是桩的嵌岩深度不够,或石质较差,嵌固力较小而造成的。因此,Jen5 桩的 $Q \sim S$ 曲线则更表现出摩擦桩的特性。

图2 Jen5 桩的 $Q \sim S$ 曲线

2.2 小变形突然破坏型

钻孔灌注嵌岩桩在高荷载作用下,通常发生小变形突然破坏。图3和图4分别画出了4根桩的 $Q \sim S$ 全过程曲线。表2列出了这4根桩的基本参数。

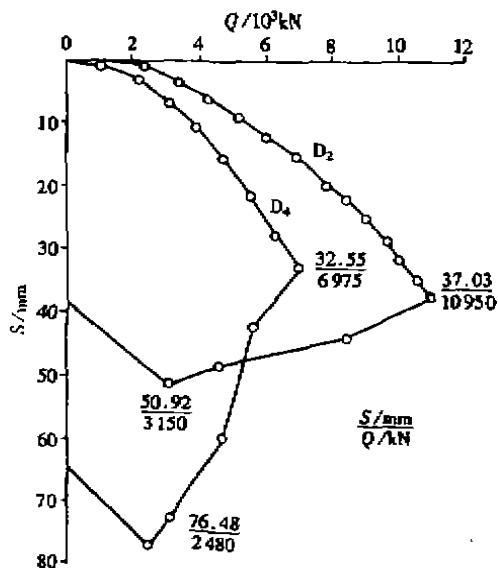


图3 D₂和D₄桩Q~S曲线

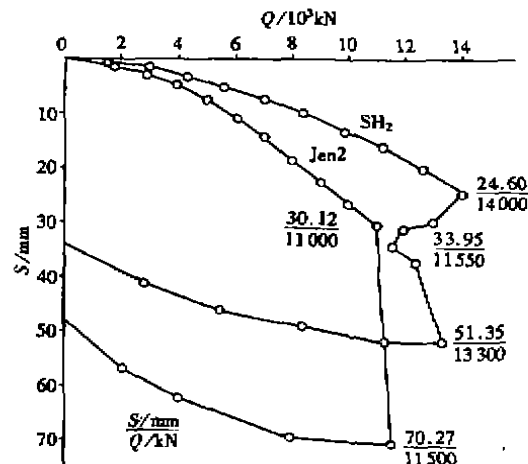


图4 SH₂和Jen2桩Q~S曲线

表2 4根破坏桩的基本参数

桩号	桩长 l/m	桩径 r/m	入岩深 h/m	岩性	要求加载 Q ₁ /kN	实际加载 Q ₂ /kN	破坏荷载 Q ₃ /kN	极限承载力 Q _u /kN	破坏点沉降 S _破 /mm	最终沉降 S _终 /mm	回弹百分比
D ₂	44.00	0.80	2.50	砾岩	12100	10950	10950	10500	37.03	50.92	23%
D ₄	44.20	0.60	2.80	砾岩	破坏	6975	6975	6200	32.55	76.48	17%
SH ₂	50.00	1.00	4.30	粉砂质泥岩	14000	14000	14000	13300	24.60	51.35	33%
Jen2	58.00	1.00	1.00	粉砂质粘土岩	12400	11500	11000	11000	30.12	70.27	32%

2.2.1 桩在破坏之前的变形特征

a. 桩在破坏之前,在各级荷载作用下,桩的沉降较为正常,级差沉降变化不大,基本上达到了设计要求的加载值,标志桩周土的摩擦力和嵌岩段的嵌固力得到了较好发挥,桩的承载能力较高。

b. 桩在破坏前一级荷载作用下,桩的沉降都能达到稳定标准, Q~S 曲线比较平缓, logt~S 曲线基本保持线性关系,没有明显的破坏前兆现象。

2.2.2 桩在破坏之后的变形特征

a. D₂和D₄桩的变形与破坏特征完全相同,以D₂为例,桩的破坏特征是:当加载到10950kN,且稳压20min时,桩的沉降只有37.03mm,几分钟后,桩突然发生破坏,桩顶荷载迅速降低,而桩仍在继续下沉,直达到3150kN时,桩顶荷载与沉降才趋于稳定,桩的沉降达50.92mm。此时,再卸载,桩仍可发

生微量回弹,但回弹量只有总沉降值的23%。从桩突然发生破坏,桩顶荷载急剧降低,而桩沉降大幅度增加,以及卸载回弹变形小等现象判断,很可能是桩体材料发生破坏。

b. SH₂桩的破坏特点是:当加载到14000kN并稳压30min后,桩顶荷载突然降低,而桩仍在继续下沉。在75min内荷载由14000kN降到11500kN,而桩的沉降由24.60mm增加到33.95mm。后又强行加载,以观察其变形发展情况。从11500kN又加到13300kN,90min内桩又沉降了17.40mm,累计沉降量达51.35mm。此时终止加载,并进行卸载,桩的回弹变形为17.40mm,为总沉降量的33%,有趣的是再次加载后的沉降量全部得到了恢复。

从桩顶荷载迅速降低,桩沉降仍在增加,再加载,压力可以增加,但桩的沉降增加幅度不大,以及再加载而桩沉降卸载后可以完全

恢复等现象判断,SH₂ 桩很可能是桩的嵌岩段发生了剪切位移破坏,使端承反力发挥了作用。

c. Jen2 桩的变形破坏特点是:当加载到 1100 kN 并稳压 90 min 之后,桩的沉降为 30.12 mm,并发现桩顶荷载略有降低(约 500 kN),之后立即补压,但只能维持在 11500 kN,而桩的沉降却成直线增加,达 70.27 mm。终止加载并进行卸载,桩回弹了 22.27 mm,回弹 32%。由桩破坏后的 $Q \sim S$ 曲线大体平行于 S 轴判断,桩周土的摩阻力和嵌固力已充分发挥而为常值。这种现象可能表明,桩的嵌岩段发生了剪切位移破坏,且桩端又存在较厚的沉渣被压缩,因而,桩的沉降成直线增加,但桩的承载力则基本保持不变。

综上所述,桩在破坏前和破坏后的特征如下。

a. 桩在破坏前没有明显的前兆现象,而是在同下一级荷载过渡或在稳压过程中发生突然破坏。从荷载急剧减小,桩仍继续下沉等判断,呈现出脆性破坏的特点。

b. 桩在破坏后,桩顶荷载急剧降低,桩继续下沉,若令其自动卸载,则桩顶荷载和沉降均可达到一个稳定值(例如 D₂ 和 D₄ 桩),此时,再进行人为控制卸载,桩仍可发生微量回弹,但残余变形比较大。

c. 桩的破坏原因可能是多方面的,但对钻孔灌注嵌岩桩,其具体破坏模式可能有两种:一是桩体材料发生破坏;二是桩的嵌岩部分发生破坏。对于产生这两种破坏模式的原因,笔者认为,钢筋混凝土桩和岩石都是难以压缩的固体材料(可视为弹塑性体)、在高荷载

作用下,桩和嵌岩部分会积聚很大的弹性应变能,一旦弹性应变能超过了桩体材料强度或嵌岩段混凝土与岩石胶结面的抗剪强度时,就会引起桩体破坏或者嵌岩部分发生破坏。

3 结 语

a. 钻孔灌注嵌岩桩属端承摩擦桩,其极限承载力主要由桩侧土层摩阻力和嵌岩段的嵌固力提供,而桩端反力只有在嵌岩段有较大的剪切位移或破坏之后方可发挥作用,因此,在钻孔灌注嵌岩桩的设计中,可不考虑端承反力的作用,而作为安全储备。

b. 钻孔灌注嵌岩桩在未破坏之前承载能力高,桩的沉降小,卸载回弹变形大,残余变形小,标志桩周土层的摩擦力和嵌岩段的嵌固力均得到了较充分的发挥。

c. 钻孔灌注嵌岩桩破坏没有明显的前兆现象,在高荷载作用下常发生突然破坏,桩破坏时表现出桩顶荷载急剧降低,而桩的沉降在继续增加,直至各自达到一个稳定值、再行卸载,桩仍可发生微量回弹。

d. 桩的破坏可能有桩体材料发生破坏和桩的嵌岩部分发生剪切破坏两种模式。

参考文献

- 1 沈保汉. 桩基础测试、勘察、设计与施工. 工业建筑, 1990:9~12, 1991:1~12
- 2 吕福庆等. 嵌岩桩静载试验结果的研究与讨论. 岩土力学, 1996, 17(1):91~96
- 3 中华人民共和国国家标准. 建筑地基基础设计规范 (GBJ7-89). 北京: 中国建筑工业出版社, 1989

(收稿日期: 1996-05-30)

盐锅峡水电站

由中国水利水电第四工程局承建的黄河盐锅峡水电站,位于甘肃省永靖县境内、电站由拦河大坝、溢流坝、坝后厂房等组成。大坝为混凝土宽缝重力坝、最大坝高 57 m,主坝坝顶长 321 m、正常蓄水位海拔 1619 m、库容 2.2 亿 m³。电站装机 35.2 万 kW,原设计装机 8 台,后又扩机 1 台、年发电量 22.8 亿 kW·h。电站于 1958 年 9 月开工,1975 年 9 月竣工。截止 1992 年底,已累计发电 475.7 亿 kW·h。

(郭志伟 摄;李俊哲 文)